



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112033710 B

(45) 授权公告日 2022. 04. 01

(21) 申请号 202010969279.X

(22) 申请日 2020.09.15

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112033710 A

(43) 申请公布日 2020.12.04

(73) 专利权人 中车青岛四方机车车辆股份有限公司

地址 266000 山东省青岛市城阳区锦宏东路88号

专利权人 成都运达科技股份有限公司

(72) 发明人 陈博 胡林桥 徐刚 张志龙  
张恒志

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理事务所  
(普通合伙) 51220

代理人 李朝虎

(51) Int.Cl.

G01M 17/10 (2006.01)

G06N 3/04 (2006.01)

G06N 3/08 (2006.01)

G06F 30/23 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 110990948 A, 2020.04.10

CN 101145214 A, 2008.03.19

CN 109115879 A, 2019.01.01

CN 109115879 A, 2019.01.01

CN 111291514 A, 2020.06.16

CN 110987389 A, 2020.04.10

CN 110378511 A, 2019.10.25

CN 110987389 A, 2020.04.10

审查员 舒悦

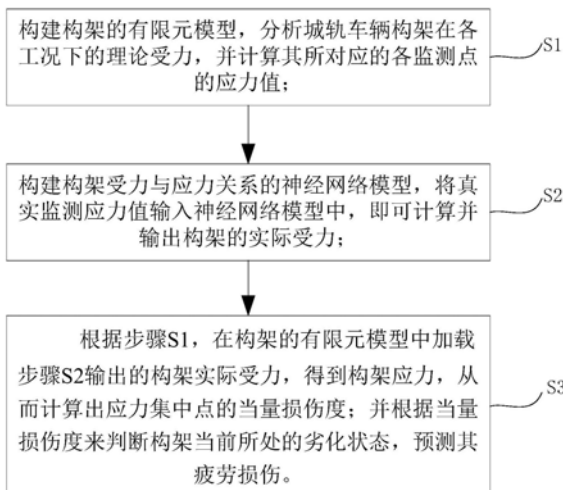
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,包括:S1:构建构架的有限元模型,分析城轨车辆构架在各工况下的理论受力,并计算其所对应的各监测点的应力值;S2:构建构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可输出构架的实际受力;S3:在构架的有限元模型中加载步骤S2输出的构架实际受力,得到构架应力,计算出应力集中点的当量损伤度;并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态。本发明将有限元模型与实际检测数据相结合,避免了单纯理论计算与实际工况差距较大的情况,能够准确找到应力集中点,得出的当量损伤度更加接近构架真实状态,从而更好的表征了构架的劣化性能。



1. 一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

S1: 构建构架的有限元模型,分析城轨车辆构架在各工况下的理论受力,并计算其所对应的各监测点的应力值;

S2: 构建构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可计算并输出构架的实际受力;

S3: 根据步骤S1,在构架的有限元模型中加载步骤S2输出的构架实际受力,得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度;并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态,预测其疲劳损伤;

步骤S1包括以下子步骤:

S11: 建立构架的有限元模型,分析构架的受力情况,确定构架在垂向、横向、纵向上的主要受力,各个力组成集合  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ ;

S12: 根据列车运行的各种工况,生成对应工况下的m组数值不同的力,将每组力分别施加在有限元模型上,得到m组各个应力监测点的应力值,每组应力值记作  $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ ;

步骤S2包括以下子步骤:

S21: 构建构架受力与应力关系的BP神经网络模型,将各组应力值  $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$  作为输入层向量,各组的力  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  作为输出层向量,导入该神经网络模型进行模型训练;

S22: 在构架上与有限元模型的监测点相同的位置安装应力传感器,采集车辆在实际运行过程中的应力值,某时刻t的各监测点的应力记为  $\{\sigma_{1t}, \sigma_{2t}, \dots, \sigma_{nt}\}$ ,并将应力  $\{\sigma_{1t}, \sigma_{2t}, \dots, \sigma_{nt}\}$  输入到步骤S21已训练好的神经网络模型中,即可输出构架的实际受力,记作  $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$ ;

步骤S3包括以下子步骤:

S31: 根据步骤S2得到的构架的实际受力  $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$ ,将构架各时刻的实际受力  $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$  重新施加在步骤S1中的有限元模型上进行计算,得到各时刻的构架实际应力分布状态;

S32: 根据步骤S31得到的有限元模型的构架实际应力分布情况,获取构架上j个典型的应力集中点各时刻的应力数据,将每个集中点的应力数据分别组合成时间序列,采用雨流计数法,计算各个应力集中点的当量损伤度,由此判断构架当前所处的劣化状态。

2. 根据权利要求1所述的一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,其特征在于,所述构架的有限元模型的主要受力包括二系弹簧座所受垂向力、电机安装座所受垂向力、横向止挡座所受横向力、牵引座所受纵向力。

3. 根据权利要求1所述的一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,其特征在于,步骤S21中构架受力与应力关系的BP神经网络模型由输入层、隐含层、输出层的神经元依次全连接而成,步骤S21具体包括:

步骤一,根据应力监测点数、构架受力数分别确定BP神经网络模型的输入层和输出层的神经元节点数;

步骤二,根据经验公式确定BP神经网络模型的隐含层神经元节点数的初始值,并采用交叉验证法,寻找最优的神经元数;

步骤三,将各组应力值  $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$  作为输入层向量,各组的力  $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  作为输

出层向量,导入初始BP神经网络模型进行训练;训练过程中使用交叉验证法,确定隐含层神经元数,最终得到的误差最小的模型,即为训练好的最优神经网络模型。

4.根据权利要求3所述的一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,其特征在于,所述步骤一中BP神经网络模型的输出层激励函数为tansig,步骤二中BP神经网络模型的隐含层激励函数为logsig;

BP神经网络模型进行模型训练时采用的训练函数为trainrp。

5.根据权利要求1所述的一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,其特征在于,步骤S32中的当量损伤度计算公式为:

$$d = \frac{L}{S} \times D$$

其中,L为车辆的设计里程;S为损伤值对应的里程;D为该时间历程对应的损伤值。

## 一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及车辆构架损伤度技术领域,具体涉及一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法。

### 背景技术

[0002] 构架是转向架的关键主体结构部件,起到支撑车体和传递力的重要作用,构架的劣化会影响城轨车辆运行的平稳性和安全性。构架的主要劣化形式是疲劳损伤,疲劳损伤的分析方法主要有理论模型计算和现场实验检测。

[0003] 理论模型计算通过加载构架的理论受力,确定构架的应力集中点,由于其使用模拟的受力驱动有限元模型,而不是实际受力,因而获得的构架应力分布与实际工况有较大差异,计算结果不能表征构架的真实状态。

[0004] 通过直接测量构架的实际受力,再加载到理论模型进行计算可以提高分析结果准确性,但直接测量构架受力十分困难,标定过程复杂且出错率高,需要用到专门的检测设备,可行性和可操作性不高。

[0005] 目前的实验检测主要是在理论应力集中点上安装应力传感器,直接获取车辆运行过程中的构架应力,但传感器只能采集固定监测点的应力。由于车辆在不同工况下,应力集中点可能不同,该方法无法准确监测到应力集中点,进而导致利用该检测应力值计算出的构架损伤度不够准确。

### 发明内容

[0006] 为克服上述现有技术中的问题,本发明提供一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,本发明基于神经网络方法,并将有限元模型与实际检测数据相结合,来进行城轨车辆构架损伤度计算,得出的当量损伤度更加接近构架真实状态,精准度高,且能够更好的表征构架的劣化性能。

[0007] 本发明通过下述技术方案实现:

[0008] 一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,该方法包括以下步骤:

[0009] S1:构建构架的有限元模型,分析城轨车辆构架在各工况下的理论受力,并计算其所对应的各监测点的应力值;

[0010] S2:构建构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可计算并输出构架的实际受力;

[0011] S3:根据步骤S1,在构架的有限元模型中加载步骤S2输出的构架实际受力,得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度;并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态;若当量损伤度不大于0.5,则构架劣化性能较好,反之则构架劣化性能较差。

[0012] 工作原理如下:

[0013] 基于疲劳损伤的分析方法主要有理论模型计算和现场实验检测,(1)理论模型计算通过加载构架的理论受力,确定构架的应力集中点,由于其使用模拟的受力驱动有限元

模型,而不是实际受力,因而获得的构架应力分布与实际工况有较大差异,计算结果不能表征构架的真实状态。通过直接测量构架的实际受力,再加载到理论模型进行计算可以提高分析结果准确性,但直接测量构架受力十分困难,标定过程复杂且出错率高,需要用到专门的检测设备,可行性和可操作性不高。(2)目前的实验检测主要是在理论应力集中点上安装应力传感器,直接获取车辆运行过程中的构架应力,但传感器只能采集固定监测点的应力。由于车辆在不同工况下,应力集中点可能不同,该方法无法准确监测到应力集中点,进而导致利用该检测应力值计算出的构架损伤度不够准确。

[0014] 因此,本发明采用上述技术方案利用实际检测数据通过神经网络模型获取构架实际受力,以实际受力驱动有限元模型,得出构架应力并计算损伤度,从而判断构架当前所处的劣化状态,并预测其疲劳损伤。本发明通过构建的有限元模型计算各工况下理论受力所对应的各监测点的应力值,并据此建立构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可输出构架实际受力;在有限元模型中加载实际受力得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度,并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态,预测其疲劳损伤。本发明方法运用在城轨车辆上,由实际检测的应力计算出构架实际受力,可解决构架实际受力难以获取的问题;将有限元模型与实际检测数据相结合,避免了单纯理论计算与实际工况差距较大的情况,并且能够准确找到应力集中点,得出的当量损伤度更加接近构架真实状态,从而更好的表征了构架的劣化性能。

[0015] 进一步地,步骤S1包括以下子步骤:

[0016] S11:建立构架的有限元模型(包括材料、边界条件、网格),分析构架的受力情况,确定构架在垂向、横向、纵向上的主要受力,各个力组成集合 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ ;

[0017] S12:根据列车运行的各种工况,生成对应工况下的m组数值不同的力,将每组力分别施加在有限元模型上,得到m组各个应力监测点的应力值,每组应力值记作 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ 。

[0018] 进一步地,所述构架的有限元模型的主要受力包括二系弹簧座所受垂向力、电机安装座所受垂向力、横向止挡座所受横向力、牵引座所受纵向力。

[0019] 进一步地,步骤S2包括以下子步骤:

[0020] S21:构建构架受力与应力关系的BP神经网络模型,将各组应力值 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ 作为输入层向量,各组的力 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 作为输出层向量,导入该神经网络模型进行模型训练;

[0021] S22:在构架上与有限元模型的监测点相同的位置安装应力传感器,采集车辆在实际运行过程中的应力值,某时刻t的各监测点的应力记为 $\{\sigma_{1t}, \sigma_{2t}, \dots, \sigma_{nt}\}$ ,并将应力 $\{\sigma_{1t}, \sigma_{2t}, \dots, \sigma_{nt}\}$ 输入到步骤S21已训练好的神经网络模型中,即可输出构架的实际受力,记作 $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$ 。

[0022] 进一步地,步骤S21中构架受力与应力关系的BP神经网络模型,BP神经网络是误差反向传播的多层节点前馈网络模型,由输入层、隐含层、输出层的神经元依次全连接而成,模型的构建与训练过程如下:

[0023] 步骤一,根据应力监测点数、构架受力数分别确定BP神经网络模型的输入层和输出层的神经元节点数;

[0024] 步骤二,根据经验公式确定BP神经网络模型的隐含层神经元节点数的初始值,并

采用交叉验证法,寻找最优的神经元数;

[0025] 步骤三,将各组应力值 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$ 作为输入层向量,各组的力 $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 作为输出层向量,导入初始BP神经网络模型进行训练;训练过程中使用交叉验证法,确定隐含层神经元数,最终得到的误差最小的模型,即为训练好的最优神经网络模型。

[0026] 进一步地,所述步骤一中BP神经网络模型的输出层激励函数为tansig,步骤二中BP神经网络模型的隐含层激励函数为logsig;

[0027] BP神经网络模型进行模型训练时采用的训练函数为trainrp。

[0028] 进一步地,步骤S3包括以下子步骤:

[0029] S31:根据步骤S2得到的构架的实际受力 $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$ ,将构架各时刻的实际受力 $\{F_{1t}, F_{2t}, \dots, F_{nt}\}$ 重新施加在步骤S1中的有限元模型上进行计算,得到各时刻的构架实际应力分布状态;

[0030] S32:根据步骤S31得到的有限元模型的构架实际应力分布情况,获取构架上j个典型的应力集中点各时刻的应力数据,将每个集中点的应力数据分别组合成时间序列,采用雨流计数法(一种计算损伤度的应力循环计数方法),计算各个应力集中点的当量损伤度,由此判断构架当前所处的劣化状态。

[0031] 进一步地,步骤S32中的当量损伤度计算公式为:

$$[0032] \quad d = \frac{L}{S} \times D$$

[0033] 其中,L为车辆的设计里程;S为损伤值对应的里程;D为该时间历程对应的损伤值。

[0034] 本发明方法设计的两个关键点:

[0035] (1)基于神经网络模型的构架实际受力推算

[0036] 基于构架在车辆运行过程中的实际受力难以通过实验检测获得,本发明将各种工况下可能出现的构架受力加载到有限元模型中,得出各个监测点的应力值;利用构架应力值与受力组成的输入输出向量,训练神经网络模型;通过已训练的神经网络模型,可推算出真实的应力值对应的构架实际受力。

[0037] (2)基于有限元模型与实际受力的构架损伤度计算

[0038] 将有限元模型与实际检测数据相结合,可计算出构架任意位置的应力状态,从而找到构架应力集中点,由集中点的应力值可算出其对应的当量损伤度,反映构架所处的劣化状态。

[0039] 本发明与现有技术相比,具有如下的优点和有益效果:

[0040] 1、本发明利用实际检测数据通过神经网络模型获取构架实际受力,以实际受力驱动有限元模型,得出构架应力并计算损伤度,从而判断构架当前所处的劣化状态,并预测其疲劳损伤;精准度高、可靠性强。

[0041] 2、本发明通过构建的有限元模型计算各工况下理论受力所对应的各监测点的应力值,并据此建立构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可输出构架实际受力;在有限元模型中加载实际受力得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度,并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态,预测其疲劳损伤。本发明方法运用在城轨车辆上,由实际检测的应力计算出构架实际受力,可解决构架实际受力难以获取的问题;将有限元模型与实际检测数据相结合,避免了单纯理论计算

与实际工况差距较大的情况,并且能够准确找到应力集中点,得出的当量损伤度更加接近构架真实状态,从而更好的表征了构架的劣化性能。

### 附图说明

[0042] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解,构成本申请的一部分,并不构成对本发明实施例的限定。在附图中:

[0043] 图1为本发明一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法流程图。

[0044] 图2为本发明一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法具体流程图。

[0045] 图3为本发明实施例中的构架受力示意图。

[0046] 图4为本发明实施例中构架应力监测点布置图。

[0047] 图5为本发明实施例中构架应力分布云图。

### 具体实施方式

[0048] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下面结合实施例和附图,对本发明作进一步的详细说明,本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明,并不作为对本发明的限定。

[0049] 在以下描述中,为了提供对本发明的透彻理解阐述了大量特定细节。然而,对于本领域普通技术人员显而易见的是:不必采用这些特定细节来实行本发明。在其他实例中,为了避免混淆本发明,未具体描述公知的结构、电路、材料或方法。

[0050] 在整个说明书中,对“一个实施例”、“实施例”、“一个示例”或“示例”的提及意味着:结合该实施例或示例描述的特定特征、结构或特性被包含在本发明至少一个实施例中。因此,在整个说明书的各个地方出现的短语“一个实施例”、“实施例”、“一个示例”或“示例”不一定都指同一实施例或示例。此外,可以以任何适当的组合和、或子组合将特定的特征、结构或特性组合在一个或多个实施例或示例中。此外,本领域普通技术人员应当理解,在此提供的示图都是为了说明的目的,并且示图不一定是按比例绘制的。这里使用的术语“和/或”包括一个或多个相关列出的项目的任何和所有组合。

[0051] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“前”、“后”、“左”、“右”、“上”、“下”、“竖直”、“水平”、“高”、“低”“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明保护范围的限制。

[0052] 实施例

[0053] 如图1、图2所示,本发明一种基于神经网络的城轨车辆构架损伤度检测方法,通过构建构架的有限元模型计算各工况下理论受力所对应的各监测点的应力值,并据此建立构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可输出构架实际受力;在有限元模型中加载实际受力得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度,反映构架劣化状态。实施时,本发明方法在城轨车辆中应用的具体过程如下:

[0054] S1:构建构架的有限元模型,分析城轨车辆构架在各工况下的理论受力,并计算其所对应的各监测点的应力值;步骤S1包括:

[0055] S11:建立构架的有限元模型,分析构架的受力情况,该模型受到的主要力包括二

系弹簧座所受垂向力( $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$ )、电机安装座所受垂向力( $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ )、横向止挡座所受横向力( $F_y$ )以及牵引座所受纵向力( $F_{x1}$ 、 $F_{x2}$ )，构架受力位置如图3所示。

[0056] S12:考虑列车运行的各种工况,生成对应工况下的若干组力,并将每组力分别施加在有限元模型上,计算出各个应力监测点的应力。例如某一组数据中,各个力{110,110,15,15,10,18,18} (单位kN)对应的测点应力值为{98,72,63,65,58,76,45} (单位MPa)。

[0057] S2:构建构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可计算并输出构架的实际受力;步骤S2包括:

[0058] S21:构建BP神经网络模型,确定神经网络结构,由于应力监测点数为7,构架受到7个力的作用,则输入层和输出层节点数分别为7和7。

[0059] 隐含层神经元数范围的经验公式为:

$$N_{hid} \leq N_{train} / [R + (N_{in} + N_{out})]$$

[0061] 其中, $N_{hid}$ 是隐含层神经元数, $N_{train}$ 为训练样本数, $N_{in}$ 、 $N_{out}$ 分别为输入层和输出层的神经元数,R为5到10之间的常数。由此确定隐含层神经元数的初始值为10。

[0062] 设置隐含层激励函数为logsig,输出层激励函数为tansig,训练函数为trainrp。然后将上述的各组应力值 $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_7\}$ 与各组的力 $\{F_1, F_2, \dots, F_7\}$ 分别作为神经网络的输入层和输出层进行模型训练。通过交叉验证法得到的训练结果中最小的误差为0.15,其对应的隐含层神经元数为8,即训练好的最优神经网络结构为7-8-7。

[0063] S22:在真实构架上安装应力传感器,安装位置与有限元模型的测点位置相同,具体位置如图4所示;图4中,应力传感器GYC01安装于一系簧座圆弧内侧,应力传感器GYC02、GYC05安装于构架主体,应力传感器GYC03、GYC06安装于电机安装座,应力传感器GYC04、GYC07安装于齿轮箱吊座;采集城轨车辆在正线运行时各点的实际应力数据,将数据按时刻进行划分,再将每个时刻的各点应力值输入到已训练好的神经网络模型中,即可输出各时刻对应的构架受力值。如某时刻各监测点的实际应力为{87,65,61,57,63,80,46} (单位MPa),通过神经网络模型输出的构架实际受力值是{108,107,16,15,11,17,17} (单位kN)。

[0064] S3:根据步骤S1,在构架的有限元模型中加载步骤S2输出的构架实际受力,得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度;并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态,预测其疲劳损伤;若当量损伤度不大于0.5,则构架劣化性能较好,反之则构架劣化性能较差。步骤S3包括:

[0065] S31:将构架各时刻的实际受力加载到有限元模型中进行计算,得到整个构架的实际应力分布状态,图5给出了某时刻的应力状态云图。

[0066] S32:从构架应力分布图中,选取10个应力集中点,获取各点的应力时间序列,使用雨流计数法,计算出该时间历程中各点的损伤度,其中最大的损伤度为 $7.6 \times 10^{-10}$ ,代入下列公式计算其当量损伤度d:

$$d = \frac{L}{S} \times D$$

[0068] 其中,L为车辆的设计里程,取 $4 \times 10^6$ km;S为损伤值对应的里程,取20km;D为该时间历程对应的损伤值。

[0069] 由此可算出,当量损伤度d为 $1.52 \times 10^{-4}$ ,该值较小,表明构架劣化性能较好。

[0070] 本发明利用实际检测数据通过神经网络模型获取构架实际受力,以实际受力驱动



有限元模型,得出构架应力并计算损伤度,从而判断构架当前所处的劣化状态,并预测其疲劳损伤。本发明通过构建的有限元模型计算各工况下理论受力所对应的各监测点的应力值,并据此建立构架受力与应力关系的神经网络模型,将真实监测应力值输入神经网络模型中,即可输出构架实际受力;在有限元模型中加载实际受力得到构架应力,从而计算出应力集中点的当量损伤度,并根据当量损伤度来判断构架当前所处的劣化状态,预测其疲劳损伤。本发明方法运用在城轨车辆上,由实际检测的应力计算出构架实际受力,可解决构架实际受力难以获取的问题;将有限元模型与实际检测数据相结合,避免了单纯理论计算与实际工况差距较大的情况,并且能够准确找到应力集中点,得出的当量损伤度更加接近构架真实状态,从而更好的表征了构架的劣化性能。

[0071] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

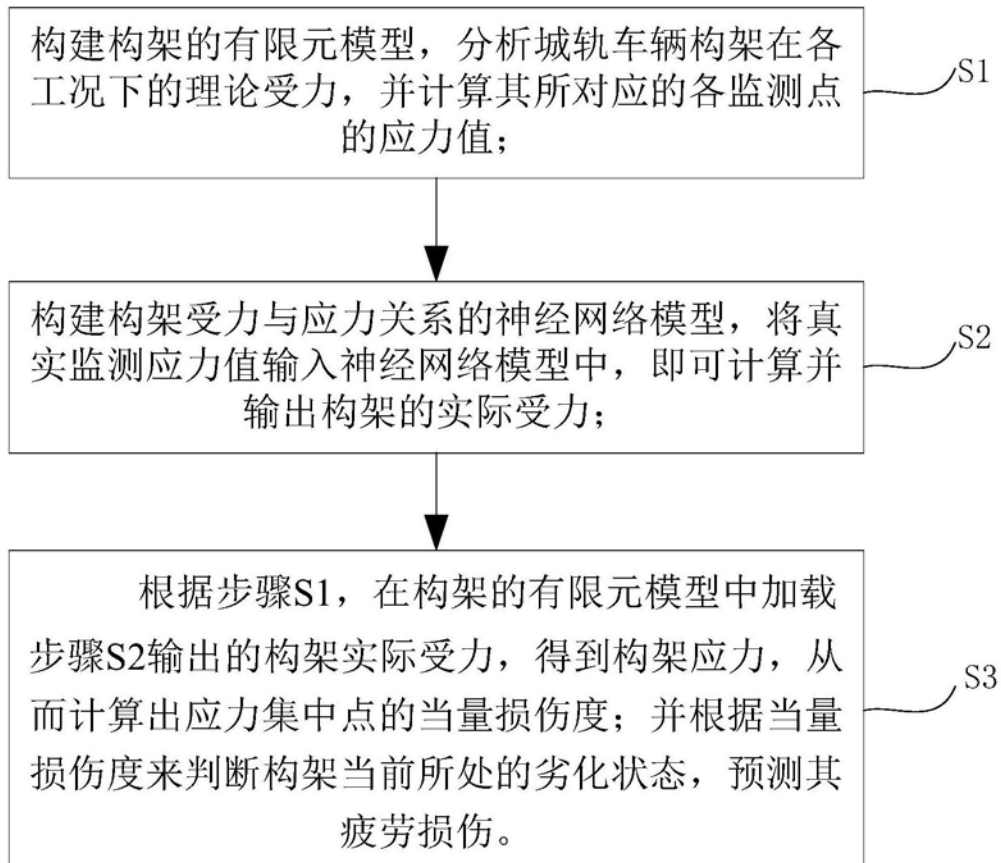


图1

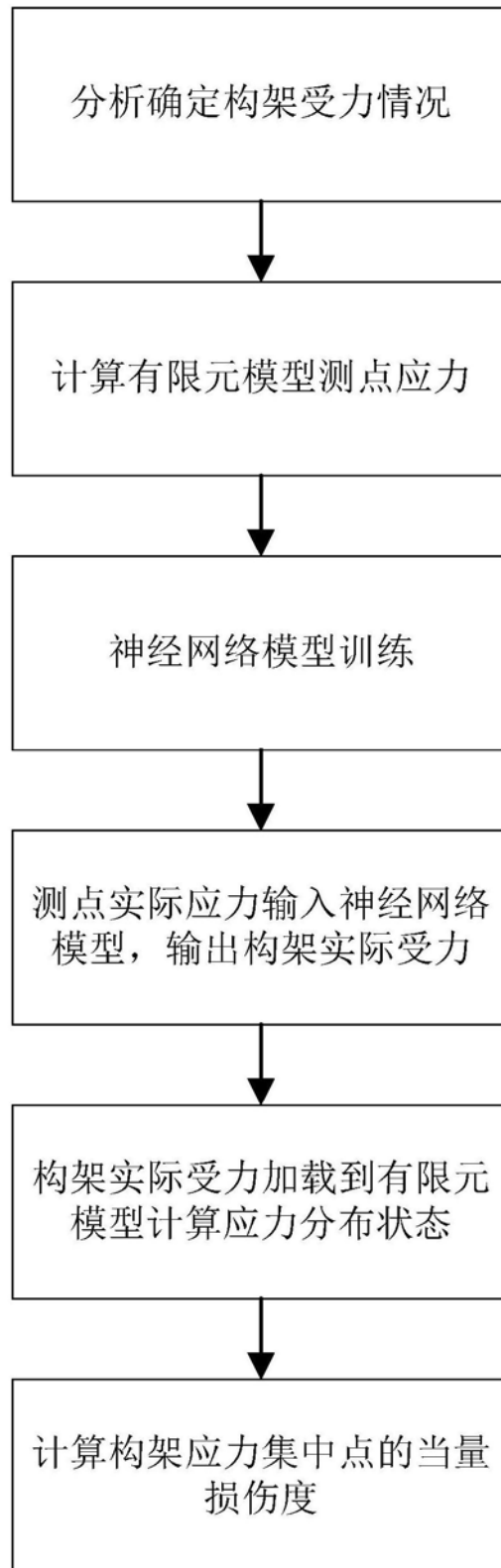


图2

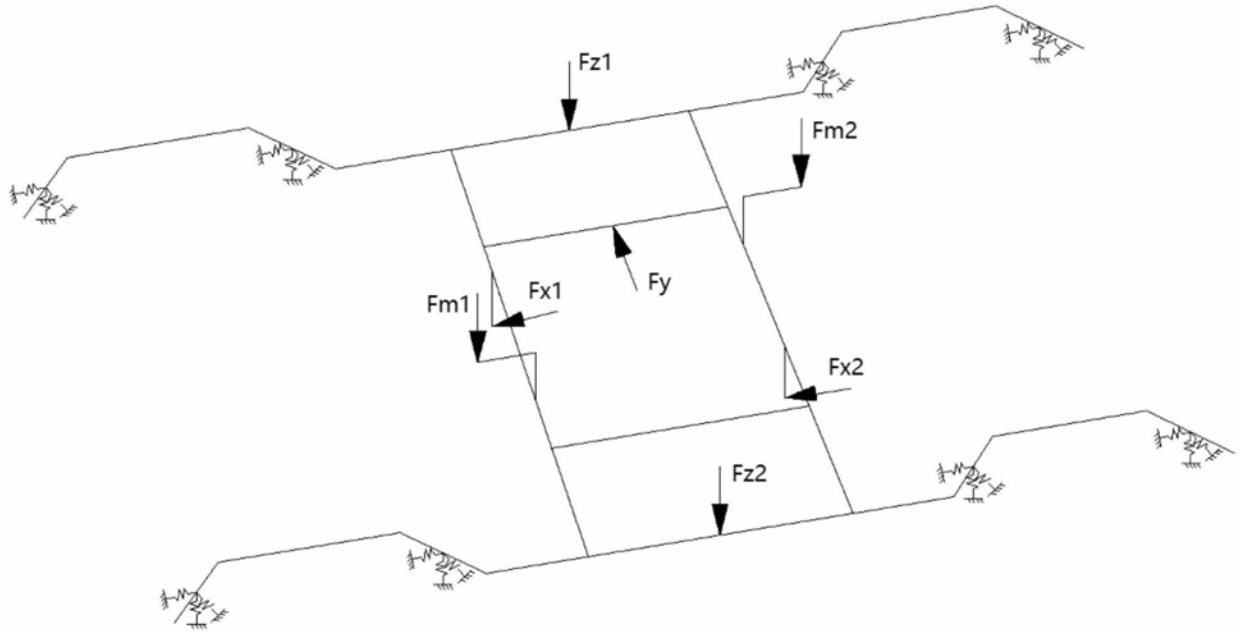


图3

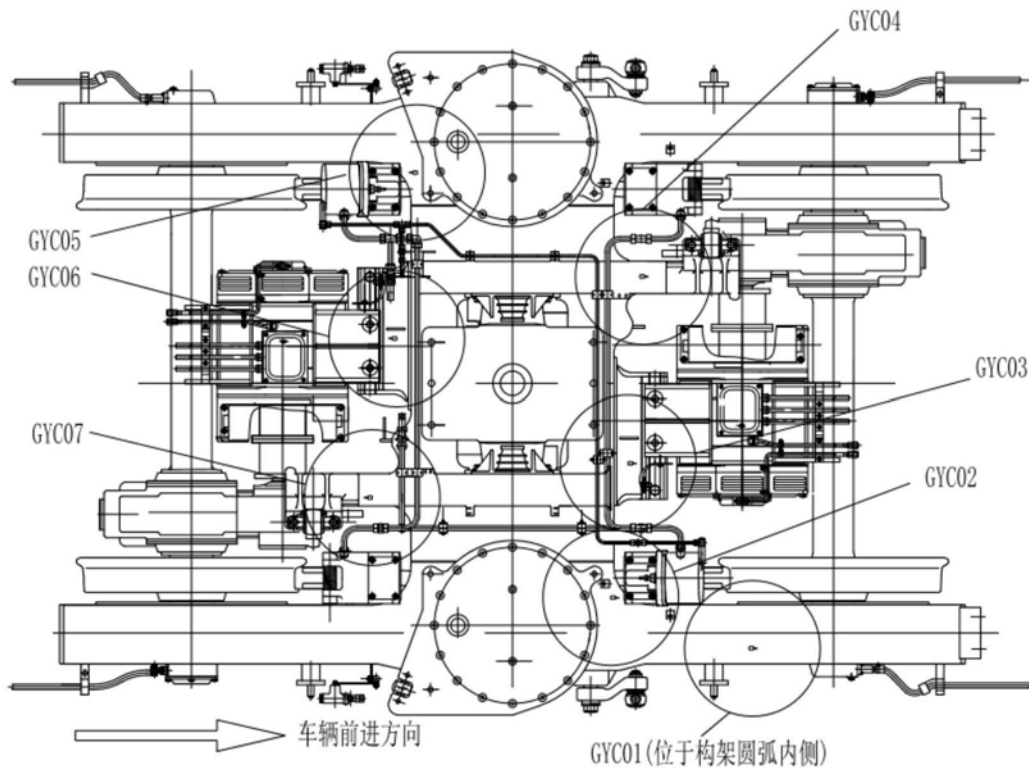


图4



图5